

# カーボンニュートラルを下支えする新たなレーザー加工技術応用について\*

## Application of New Laser Processing Technology to Support Carbon Neutrality

白井 秀彰  
Hideaki SHIRAI

In recent years, environmental consciousness has been raised on a global scale, and challenging regulations concerning the environment have been enacted. In the automobile industry, exhaust gas regulations are being tightened year by year. To respond to such tightening of regulations the electrification of vehicles is being promoted. As a trend of products in Denso toward electrification, the number of integrated mechanical and electrical products such as motors and batteries is predicted to increase. In this article, we focus on laser beam machining, a key technology to support carbon neutrality, and introduce specific examples of machining purposes and effectiveness.

Key words :

*e-mobility parts, welding of copper, Laser welding, visible wavelength, mass-production*

### 1. 緒言

20世紀が生んだ三大発明の一つとも言われるレーザーは誕生後約50年以上を経て、科学研究分野のみならず、種々の産業界においても着実にその地位を確立しつつある。特に、最近の各種レーザー発振機の性能向上とコストダウンは目覚しく、従来加工技術に替えてレーザー加工を採用するユーザも増加している。21世紀に入りエネルギー効率の向上、省エネルギーの観点から半導体レーザーやファイバレーザーが注目を集めている。また、近年の地球規模での環境意識の高まりや環境に配慮した取り組みや規制が行われている。自動車産業において

は、年々排出ガス規制が強化されており、こうした規制強化に対応するため、車両の電動化が進められており、電動化に向けたデンソーにおける製品の動向としてモータやバッテリー等機電一体製品の増加が進むと予測している。最近の自動車及び自動車産業においては①地球環境への影響を考慮したCO<sub>2</sub>排出量低減やリサイクル性向上、更に②安全性のより一層の向上を目指し、自動運転技術や電動化が要求されており、これらの部品の小型軽量化・信頼性向上・コストダウンだけでなく、新たな機能を発現することによる差別化が重要となっている。例えば、製品特性では、高精度・小型化・高性能等のニーズが求められており、これらを

構成する部品にも新たな機能の付与や、微細化・高精度化などの技術開発が一層求められている<sup>1)2)</sup>。

また、自動車部品産業においては、扱う製品の特徴、製品要求及び生産の特徴から Fig. 1 に示す生産ラインへの要求仕様が望まれる。つまり、自動車部品は、温度、振動などの環境が極めて厳しい自動車に取り付けて使用するために高い信頼性が要求される。また、全自動・大量生産による低コスト化が要求され、生産ラインにおいては工程内での加工品質保証が求められる。更に自動車部品の各取り付け位置における環境条件は過酷となり、特に、エンジンルーム内においては高温、高振動環境にある。したがって、市場での溶接不良は製品機能の停止を招き、重大事故につながるため、溶接部の品質保証法確立は開発技術の実用化にとって必須である。一方で近年の製品多機能化に伴い、求められる溶接精度は益々高くなり、使用材料は多岐に亘るようになってきた。このため、全要素のばらつき検討の不十分さに起因し、従来の工程能力保証だけでは確実な品作り込みが困難となってきた。

以降にカーボンニュートラルを下支えするレーザー加工の歴史と加工目的、およびその有効性をポイントに具体的な事例を紹介する。

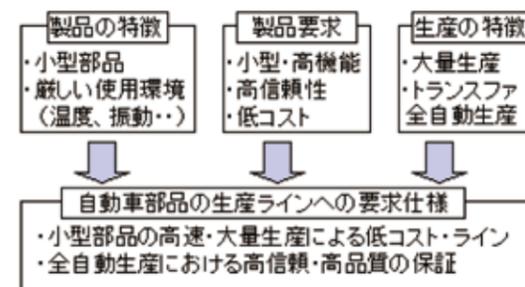


Fig. 1 Features of the production line in automotive parts

### 2. 自動車産業におけるレーザー適用の歴史

本章では、自動車産業におけるレーザー加工適用の歴史について整理する。1974年にGM社がパワーステアリングギヤハウジング内面のレーザー焼き入れに実用化したのが始まりとされている。この後、多くの自動車メーカーが研究を開始し1980年代にレーザー切断が実用化され、1985年前後よりボディパネルや樹脂部

品の3次元切断、ギヤ及びパネルのレーザー溶接が実用化される。また、エンジンバルブのレーザー肉盛りも実用化される。自動車部品産業においては実用化事例の発表が少なく、これまで実用化の歴史が必ずしも明確になっていない状況にあるが、Fig. 2にデンソーでの導入の歴史を例にとりて簡単にまとめて示す。1973年にCCOセンサのリードとターミナルのかしめ部にYAGレーザーにてスポット溶接を実施し高温での導通信頼性を確保したのが始まりである。ただし、作業者が部品をセットする手動機レベルでありレーザーの特徴はまだ十分に生かされていなかった。本格的に自動化ラインにレーザーが展開されたのは1982年である。詳細は割愛するがオルタネータステータコアとディストリビュータシャフトプレートに1kWCO<sub>2</sub>レーザーが採用されたのをきっかけに各種部品の溶接にレーザーが展開されてきた。

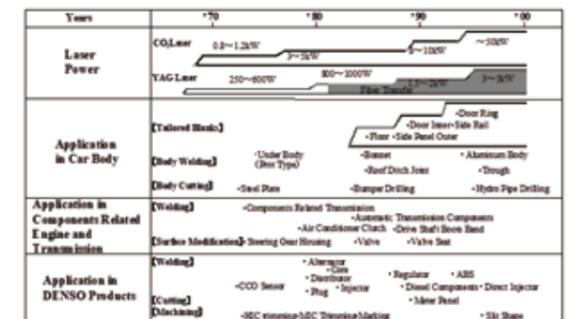


Fig. 2 History of laser processing research in the automotive industry

### 3. 従来のレーザー溶接における適用材料の拡大化

自動車部品の小型・高性能化に伴い加工対象材料は、より高強度化、高機能化が進んできた。レーザー溶接を例にとると、より高強度、高硬度である高炭素材料の溶接や電子部品への適用ニーズが拡大し銅材料の微細接合が求められるようになってきた。従来のアーク溶接でも困難な高炭素鋼の溶接を更に凝固速度の速い、つまり割れやすい材料やレーザーに不向きな高反射材料である銅材料をレーザー溶接で実施することが求められてきた。さらに、気密を要する部分に対しての要求も高まってきた。これら課題に対し、対応を行い実用化を達成した事例を以下に示す。

\*レーザー協会の了解を得て、協会誌 第48巻より一部加筆して転載

### 3.1 電磁弁用高炭素ステンレス鋼の溶接事例

各種電磁弁製品が開発されている。この部品には耐摩耗性が要求され高硬度の高炭素鋼ステンレス鋼が使用される。この材料は溶接割れの危険がともなうため、従来の製品では接合法として「かしめ」が採用されていた。ただし、「かしめ」接合法では小型化及び接合コスト低減に限界があり、小型接合が可能なレーザー溶接法の実現検討を実施した。電磁弁の溶接概要を Fig. 3 に示す。

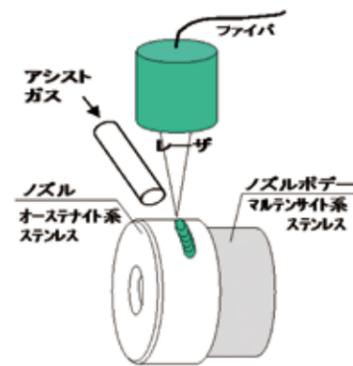


Fig. 3 Overview of Solenoid Valve Welding

具体的な実現方法として、溶融形状を Fig. 4 に示す従来品ワインカップ状から開発品のタンブラー形状とすることにより最終溶融凝固部に発生する収縮応力を大幅に低減可能であることを確認している。タンブラー形状実現には溶融時の溶融金属の対流に着目し、アシストガスの効果を確認した。Fig. 4 に Ar 中に酸素 O<sub>2</sub> を加えたときの溶融部形状の変化状態を示す。結果として、大気中で溶接を実施することによりタンブラー形状が実現することを確認できた。

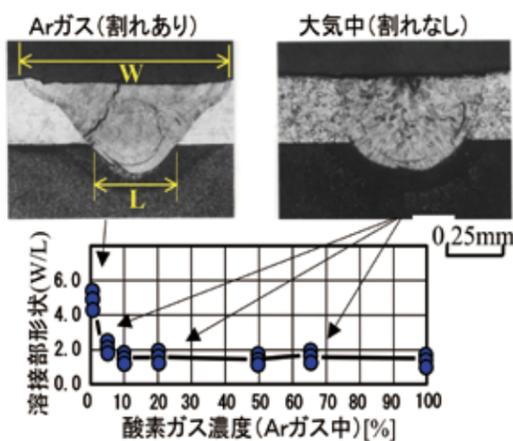


Fig. 4 Melted shape by assist gas

### 3.2 HIC 用銅リードのレーザー結線事例

車載用エレクトロニクス製品が多く製品化されているが、HIC 製品に於いては外部ターミナルと内部回路の結線が不可欠となる。従来この結線は、内部基板に銅リードをリフローはんだ付し、手作業にてリードをターミナル上にフォーミング後に手はんだ付を実施していた。しかし、製品の搭載場所の高温化及び製品の超寿命化要求に対し、はんだが銅リードに流れた場合に銅リードで温度履歴による歪みを吸収できなくなり、基板上のリフローはんだ付部が疲労破断する危険性が生じてきた。

そこで、レーザー溶接により銅リードの自動ワイヤリングを低コスト、高信頼性が実現できるように検討した。本レーザー自動結線法は、各種 HIC 製品に展開されている。具体的検討内容としては、まず銅リードのレーザー吸収率を改善するために銅との拡散性が良い Sn めっきを銅リード上に施している。また、ターミナル材としては黄銅 (Bs) 及び SPCC または Ni-Fe 合金が使用され、銅との固溶性が悪く溶接割れ及びブローホールの発生が生じる組み合わせとなっている。

これに対しては、重ね溶接の下側ターミナルを必要最低限の溶融に抑える工夫もなされている。具体的には、ターミナル表面上に融点が高く溶融潜熱の高い Ni めっきを施すことにより上側の銅リードからの熱伝導のバリアとして活用している。その他、ガスのアシスト及び焦点位置の最適化、さらにレーザー照射波形の最適化等を実施することにより Fig. 5 に示す下側ターミナルが必要最低限の溶融、上側リード表面が富士山形状となり最終凝固部であるビード表面中央に収縮応力が発生せず割れにくい形状を実現している<sup>3)</sup>。代表的製品外観写真を Fig. 6 に、製品構造及び接合装置概要を Fig. 7 に示す。

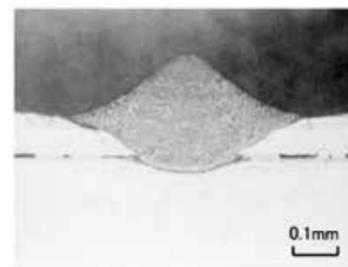


Fig. 5 Lead Weld Section

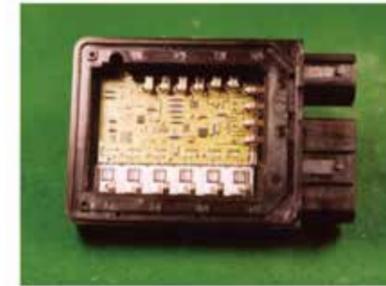


Fig. 6 Hybrid IC

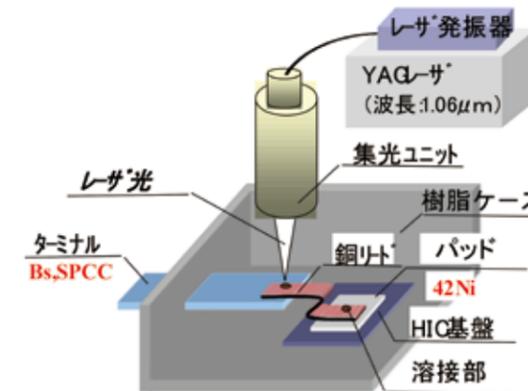


Fig. 7 Lead Weld Overview

## 4. 最新技術の適用事例

前章までは、自動車産業におけるレーザー溶接技術の変遷やラインの特徴、時代のニーズに則した溶接技術開発事例を紹介してきた。本章では、近年の地球規模での環境意識の高まりや様々な産業で環境に配慮した取り組みや規制が行われる中で、自動車産業においては年々排出ガス規制が強化されている<sup>4)</sup>。こうした規制強化に対応するため、車両の電動化が進められており<sup>5)</sup>、電動化に向けたデンソーにおける製品の動向としてモータやバッテリー等機電一体製品の増加が進んでいくと予測されている。車両当たりの製品搭載点数拡大に対応するため、製品の小型化・低コスト化・エネルギー効率の高効率化が求められる。しかしながら、電動化製品の導電材料として広く利用される銅材料においてレーザー溶接は、スパッタと呼ばれる溶融金属の飛散が発生しやすいため、非常に難しいことが知られている。これまでレーザープロファイル制御やレーザー走査方法の工夫によるスパッタ抑制技術の開発は進められていたが、現状完全なスパッタレスは達成できていな

い。本章では、銅の波長吸収特性に着目し、従来の赤外線レーザー (波長 1064nm) に比べて短波長領域のレーザーを用いてスパッタ抑制の効果を検証した事例を紹介する。

### 4.1 現状の課題

レーザー溶接は、光を集光させることで局所入熱が可能であり、エネルギー密度を大きくすることができるため、熱影響の低減が期待できる。光学系制御のみで溶接位置を制御でき、加工時間短縮も見込めることから量産化には、非常に有効な組付け技術である。しかしながら、電動化部品の導電材料として広く利用される銅材料は熱伝導率が非常に高く、また、溶接で一般的に使用される赤外線波長のレーザーに対して反射率が高い<sup>6)</sup>。レーザー出力を上げることで入熱量を補う必要があるが、入熱過多により、Fig. 8 のようなスパッタと呼ばれる溶融金属の飛散が発生しやすくなる。本節では銅材料における高信頼レーザー溶接技術確立を狙い、課題となっているスパッタレス溶接技術開発に着手した。

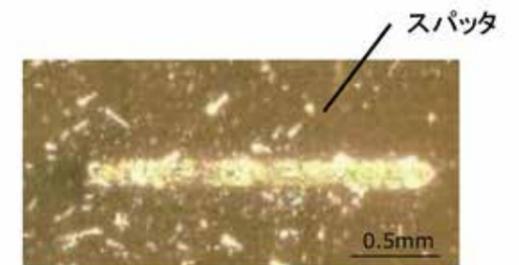


Fig. 8 State of sputter generation

### 4.2 スパッタ発生メカニズムと抑制の考え方

スパッタレス手法検討のため、まずレーザー溶接時におけるスパッタ発生メカニズムと従来のスパッタ抑制技術の考え方について示す。まずスパッタ発生プロセス<sup>7)</sup>について概略図を Fig. 9 に示す。レーザー照射による入熱が進むと金属は溶融・蒸発が起きる。銅が固体から気体へ相変化すると、体積膨張率は約 3 万倍になる。この時に膨張した金属気体に押し出されることで、溶融金属に流れが発生し、溶融池表面にゆらぎが生じる。発生した金属蒸気による上昇気流が表面で揺らいだ溶融金属にせん断力を与え、吹き飛ばすことでスパ

ツタが発生する。

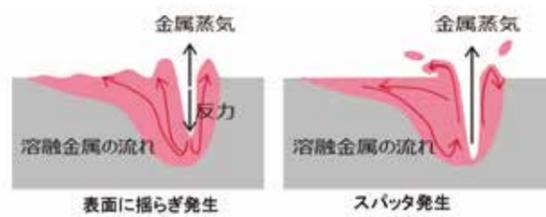


Fig. 9 Sputtering mechanism

### 4.3 従来のスパッタ抑制技術

スパッタ発生に対してこれまで開発されてきたスパッタ抑制手法を示す。主な手法として Fig. 10 のようなビームパラメータ制御による方法、Fig. 11 のようなビームプロファイル制御の方法<sup>8)</sup>、Fig. 12 のようなレーザの繰り返し走査（ウォブリング）<sup>9)</sup>があげられる。いずれも熔融池サイズを拡大することで熔融金属の流れを分散させ、表面の揺らぎを抑える手法である。

これらの手法は鉄系材料には優れたスパッタ抑制効果を発揮した。しかしながら、銅材料に対して高反射率、高い熱伝導性を補うため、高出力レーザを照射する必要がある。過剰入熱しやすく、熔融金属の流れを抑制できないため、スパッタを防ぐことは困難であった。そこで、新たなアプローチでのスパッタレス溶接技術開発を進めた。

まず、固相状態の吸収率改善方法を検討するにあたって、なぜ銅の吸収率が小さいのか物理現象から考えた。光とは光子と呼ばれるエネルギーの粒が振動しながら伝搬する現象である。銅の温度上昇の傾向を理解するために金属の吸収率からレーザ照射時間と温度の推移を試算した。レーザ照射パワーと吸収率、入熱量には次式のような関係式がある。

$$P_{in} = P_0 A$$

( $P_{in}$ : 入熱パワー  $P_0$ : レーザ照射パワー  $A$ : 吸収率)  
 入熱パワーに時間を積算することで入熱量を計算することができる。以上の計算からレーザ照射パワーを固定したときの、温度推移を計算し、プロットした点を平滑線でつなぐと Fig. 13 のようなグラフが得られた。熔融後の吸収率増大により、金属熔融後急昇温することが示された。

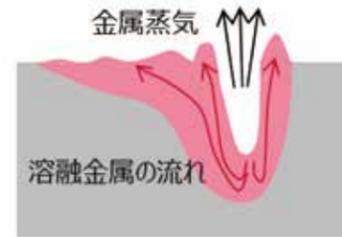


Fig. 10 Beam parameter control

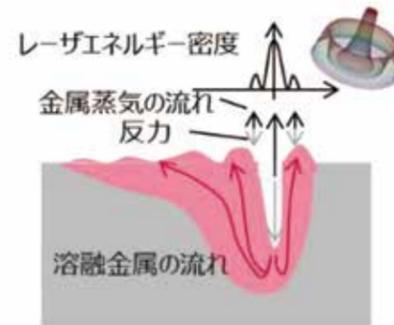


Fig. 11 Beam profile control

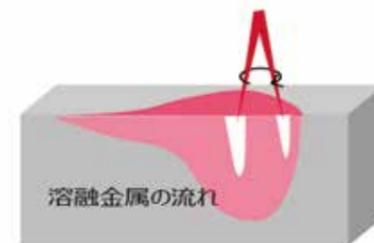


Fig.12 Wobbling technology

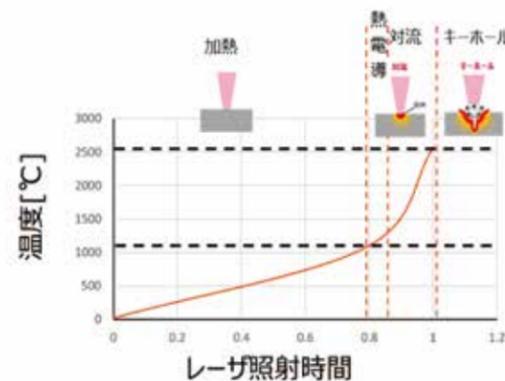


Fig.13 Temperature transition during laser irradiation

### 4.4 スパッタレス溶接技術の確立へのアプローチ

スパッタ発生状況からスパッタ抑制のためには2つのポイントがあると考えた。まず1つ目のポイントは固体の吸収率改善である。低出力加工で効率よく入熱することが可能となり、金属熔融後に吸収率が大きくなった場合でも過剰入熱しにくくなると考えた。2つ目のポイントは Fig. 14 のような固液の吸収率差低減である。熔融後の急昇温を抑制し、突沸を抑えることができると考えた。

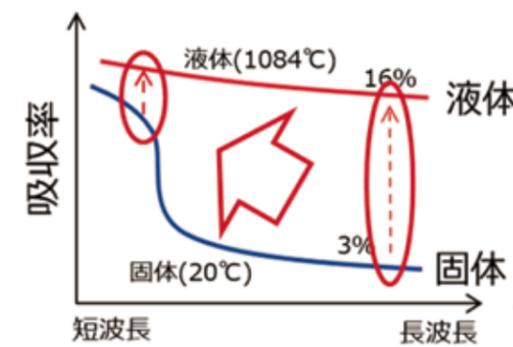


Fig.14 The concept of sputter suppression

Fig. 15 に溶接対象となる主な金属材料の吸収率波長依存性を示す<sup>10)</sup>。Fig. 15 よりこれまで溶接で用いられてきた赤外線レーザ（波長 1064nm）に対して光の吸収率が低い銅であっても短波長レーザであれば吸収特性を向上できることが分かる。

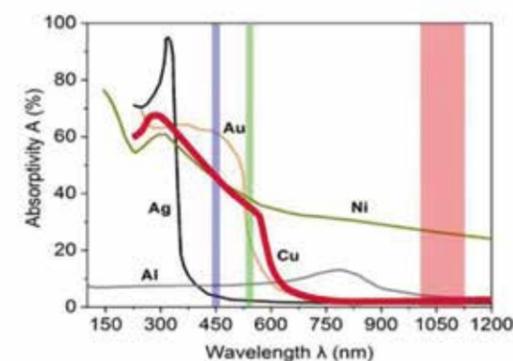


Fig. 15 Wavelength dependence of absorption rate

### 4.5 製品形状テストピースにおけるスパッタレス効果確認結果

次に本技術を製品に適用した場合でもスパッタの発生しない安定した熔融池形成を再現できるか確認した。製品形状の場合、接合する2部材の継手形状や熱

容量差等が出来栄えに大きく影響すると考えられる。今後の適用先として有力な継手形状に対して効果を検証した。

まず、最初にモータのコイル線を対象とした平角線溶接に対するスパッタ抑制効果を確認した。Blue レーザを用いた平角線の継手概略図と溶接結果を Fig. 16 に示す。現行製品の溶接は TIG 溶接とレーザ溶接が用いられている。TIG 溶接の場合、熱影響が大きいので、継手を長く確保している。レーザ溶接の場合、前節で述べたウォブリングと呼ばれるレーザ走査を行っているが、完全なスパッタレスは実現できていない。熱影響低減とスパッタレスを期待し Blue レーザを用いた吸収特性改善の効果を検証した。レーザ出力 1500W、走査速度 5mm/s とした時の溶接出来栄えを示す。スパッタを発生せず溶接できたほか、被膜の変色状況から周囲への熱影響抑制効果も確認できた。また、熔融深さのばらつきもなく、溶込み深さが非常に安定した熔融池が形成できることもわかった。

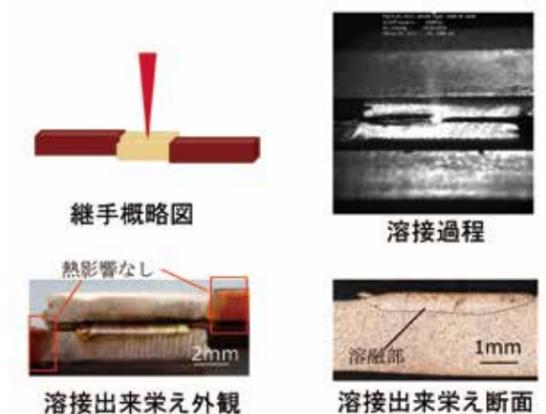


Fig. 16 Square Copper Wire Welding

次に端子同士の接続を模した形状での効果を確認するため Fig. 17 のような熱容量差の大きい継手形状に対して溶接テストを行った。今後、製品の小型を実現するため、微細端子の溶接が必要となってくる。この時、非接触かつ局所加熱可能なレーザ溶接を適用することの効果は大きいと考えられる。レーザ出力 820W、照射時間 200m とした時の出来栄えを示す。Blue レーザを用いた吸収特性の改善により、スパッタの発生しない安定した熔融池が形成できた。また、表面張力により溶け落ちることがなく、熔融池を端子端

特  
集

部に形成することができた。以上の結果より、波長吸収特性に着目したスパッタ抑制の考え方は効果的であり、産業用途として十分適用可能な手法であることを確認することができた。

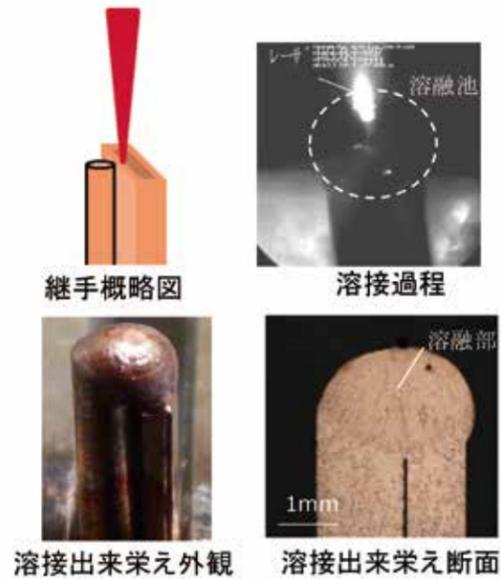


Fig.17 Terminal Welding

## 5. 今後の展開

今回の取り組みにより、短波長レーザーを用いて吸収特性を改善することで溶融池の急昇温を防ぎ、緩やかな入熱プロセスを発現できた。今後は Blue レーザ溶接技術開発を継続するとともに、溶接以外のアプリケーションに対しても適用範囲拡大検討を進め、製品競争力に貢献する技術へと進化させていく。

BlueLaser によるスパッタ抑制技術については製品適用を目指し、試作段階から課題出しと刈り取りを進めるとともに、前工程、溶接、検査に至るまで工程スルーでの検討を進める。先を見据えた研究開発としては主に溶接品質向上を進める。例えば、さらなる接合面積拡大の要求を見越し、溶融池サイズを大きくするために、これまで溶接に使われてきた赤外線波長帯域のレーザーを併用してエネルギー密度を確保するなど新たな加工技術提案・開発も進めていく。

## 6. 結言

自動車部品は今後もより小型・高性能化および低コスト化が求められていく。これに伴い異種材や難溶接材料の多様化が進み、微細局所高速溶接がさらに求められるであろう。また、溶接以外への適用範囲拡大のためにはよりビームクオリティが高く、ビーム品質の安定したレーザー発振機が必要となる。さらに省エネルギーを考慮した場合、エネルギー効率の高い半導体レーザーへの注目も高くなり、レーザーの特徴を活かした加工技術のアプローチも重要となる。周辺技術としては、加工プロセスモニタリングを進化させ、その状態や欠陥をレーザー出力へフィードバック／フィードフォワードすることにより、加工品質を全数確実に判別できうる品質モニタリング、できれば品質制御技術の進歩に期待するところである。

製品の小型化・高精度化、大幅なコスト低減に加え、CN（カーボンニュートラル）や CE（サーキュラーエコノミー）の観点を考慮すると、レーザー溶接への期待は今後も更に増加していくと考えられる。しかし、実現のために生ずる課題は、一企業、一研究機関の力で達成することは効率も悪く、難しい。そのため共通の課題を実現していくには世界的規模での仕組みを作り、レーザーの持つポテンシャルを引き出し、有効に利用することができれば更に多くの分野への適用が可能であると確信する。

## 参考文献

- 1) F. KOJIMA: Current Status and Future Perspective of Parts Processing Technologies in DENSO, DENSO Technical Review, Vol.6, No.2 (2001), 11-19
- 2) 宮田：小物部品へのレーザー加工の適用、溶接技術1998年11月号、102-104
- 3) 荻野：車載用電子回路の高信頼結線技術の開発、自動車技術会学術講演会前刷集936、1993-10
- 4) 環境庁「自動車排出ガス規制について」、<[https://www.env.go.jp/air/car/gas\\_kisei.html](https://www.env.go.jp/air/car/gas_kisei.html)> (参照2020-08-06)
- 5) みずほ銀行産業調査部「自動車電動化の新時代」Mizuho Industry Focus, Vol.205, (2018)
- 6) 国立天文台：理科年表、丸善(2006)、P.523
- 7) Heider, A., Sollinger, J., Abt, F., Boley, M., Weber, R., Graf, T.: " High-Speed X-Ray Analysis of Spatter Formation in Laser Welding of Copper", Physics Procedia 41, (2013),

P.112-118.

- 8) S.Feuchtenbeiner : "Beam shaping BrightLine Weld: latest application results", Proc. SPIE LASE 2019, Vol. 10911.
- 9) B. Samsonら：ILSJ technology report (2017), P.20-23
- 10) レーザラインホームページ「銅の溶接」  
(<https://www.laserline.com/ja-int/レーザー溶接-銅材料/>) (参照2020-08-06)

## 著者



白井 秀彰

しらい ひであき

先進プロセス研究部 博士(工学)  
接合・レーザー加工プロセスの要素技術  
開発に従事